

Opponensi vélemény Hofer-Szabó Gábor “Causality, locality, and probability in quantum theory” című doktori értekezéséről

Az értekezés a tudományfilozófia, ezen belül a kvantumelmélet filozófiai alapjai témakörbe tartozik. Ez jelenleg az egyik legaktuálisabb és legizgalmasabb témaköre a tudományfilozófiának. E területnek Hofer-Szabó Gábor nemzetközileg ismert és elismert kutatója.

Az értekezés a jelöltnek ebbe a témakörbe tartozó 10 önálló cikkének egymás után fűzése 10 fejezetben. A mű koherens mind tartalmilag, mind stílusban. A témák logikusan következnek egymás után, mindegyik segíti a másik megértését. Mindegyik fejezet egy új gondolat/eredmény világos kifejtése köré szerveződik, a következő módon: a tudományos háttér és az új eredmények rövid ismertetése, aztán jön a definíciók és/vagy az adoptált matematikai modell szabatos kifejtése, az új tudományos tézis ismertetése, legtöbbször egyszerű modelleken és ábrákkal illusztrálva, majd összefoglalás hogy milyen új tézis hogyan lett kifejtve a dolgozatban. A szabatos matematikai levezetések függelékben. A stílus rendkívül világos, érthető, könnyűvé és élvezetessé teszi az olvasást.

A dolgozatban a tudományfilozófia, fizika és matematika módszerei és gondolatai egyenlő súllyal, harmonikusan ötvözve vannak jelen. Mind a 10 fejezet egy témakör szokásos és néha hallgatólagos feltételezését vizsgálja, ezek egymás közti viszonyát, szükségességét, elégségességét, gyengíthetőségét analizálja logikai szabatossággal. Matematikában az ilyen típusú vizsgálatokat “reverz matematikának” szokták hívni.

A doktori mű részletesebb tartalmi ismertetése következik. A disszertáció fő szereplői a Bell egyenlőtlenség, az EPR kísérlet, klasszikus valószínűségelmélet, algebrai kvantumtér elmélet, a reichenbach-i közös ok változatai,

Bell lokális kauzalitás fogalma, nem-korrumpált (nem-együttműködő, non-conspiratorial) magyarázatok.

A Bell-egyenlőtlenség (és kifinomultabb formája pl. a Clauser-Horn egyenlőtlenség) összefüggő (korrelált) események valószínűségei között fennálló egyenlőtlenség, amelyet Bell három elv betartásával vezetett le. Ezek: Az elmélet fogalmai, módszerei klasszikus ontológiájúak, az eseményeknek van téridőbeli elhelyezkedése, és fizikai hatás nem terjed gyorsabban mint a fénysebesség. E három dologra/feltevésre úgy szokás hivatkozni, hogy az elmélet klasszikus, lokális és kauzális. Bell remélte, hogy a kvantumelméletet fel lehet ezek betartásával építeni, és ebben a szellemben vezette le a Bell egyenlőtlenséget.

Kiderült azonban, hogy vannak kísérletek, amelyek nem teljesítik (más szóval megsértik) a Bell egyenlőtlenséget, például az Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) kísérlet ilyen. Nem lehet tehát a kvantumelméletet úgy felépíteni, hogy az klasszikus, lokális és kauzális legyen? Ez a szituáció tipikusan felveti a fogalmi és logikai analízis szükségességét. Nyilvánvalóan nem lehet mindhárom elvet változtatás nélkül megtartani. Eldobjuk-e az egyiket, de melyiket? Vagy tartjuk meg mindhármát de alkalmasan gyengített formában? Van-e esetleg hallgatólagos feltevés a Bell egyenlőtlenség levezetésében ami miatt az sérül, nem a három alapelv miatt? A disszertáció mind a 10 fejezetének ez a fogalmi-logikai analízis a témája.

Tipikus példa a második fejezet, ahol azt vizsgálja a szerző, hogy a kauzalitás milyen szerepet játszik a Bell egyenlőtlenség levezetésében. Azt, hogy az elmélet kauzális legyen annak ellenére, hogy vannak térszerűen elválasztott események, melyek között korreláció van, közös ok feltételezésével lehet elérni (hiszen direkt kauzális kapcsolat nem lehetséges köztük a térszerű szeparáltságuk miatt). A szerző három elvet vesz górcső alá. Ezek a reichenbach-i közös ok elv, Bell lokális kauzalitás elve, és Einstein valóság-kritériuma. Definiálja ezeket és vizsgálja szerepüket a Bell egyenlőtlenség levezetésében. Melléktermékként azt kapja a szerző, hogy a Bell egyenlőtlenség levezetésében igen fontos az ún. no-conspiracy elv, ami azt mondja, hogy a közös ok amivel magyarázzuk a korrelációt legyen független (korrelálatlan) a mérési elrendezéstől.

A harmadik fejezet ezután ezt a no-conspiracy elvet elemzi. Amikor teljesül a no-conspiracy elv, akkor nem feltétlenül szükséges beszélni mérési elrendezésről és mérésről, mert ezek “nem szólnak bele a valóságba”. Jól működnek, tehát a háttérben maradnak. Ezután a szerző példákat mutat, ahol nem teljesül ez az elv. Az egyik ilyenfajta példa, amikor a mérési eljárás

során kopik vagy változik az eszköz. A szerző példákkal rámutat arra, hogy a no-conspiracy elv nemcsak ilyen módon tud sérülni, hanem úgy is, hogy a mérési eljárás és a valóság definíciói logikailag nem függetlenek egymástól. A morál az, hogy minden egyes elmélet esetében oda kell figyelni, hogy a no-conspiracy elv teljesüljön.

A legmélyebb és legkifinomultabb elemzésnek az első fejezetbeli tartom, ez a fejezet tetszik a legjobban a 10 közül. Komplex, finom gondolkodást igényel. Félig top-down, félig bottom-up közelítés. Gondosan megkülönbözteti az empirikus tartalmat a matematikai reprezentációtól, ez teszi lehetővé a két közelítésmód kombinálását. A kvantumelmélet top-down közelítésében a system, measurement, outcome, state empirikus fogalmakat rendre Hilbert tér, önadjungált operátor, ennek spektrál projekciója, illetve density operátor reprezentálja. A Born szabály kapcsolja össze az empirikus tartalmat a matematikai reprezentációval: a matematikai reprezentáció helyes (hű, használható), ha a mérések eredményeinek relatív gyakoriságából kiszámított valószínűségek megegyeznek a reprezentációból a trace-formula szerint kiszámítottal.

Ezt a top-down közelítést úgy teszi “bottom-up”-á, hogy a fent leírt közelítésből elhagy egyetlen elemet, nevezetesen azt, hogy a state az density operátorral legyen reprezentálva. Megengedi, hogy a state tetszőleges, nem feltétlenül density operátorral legyen reprezentálva. Ezután három konkrétan megadott és egyre komplexebb helyzetben azt kérdezi a szerző, hogy vajon a reprezentáció többi szabályát betartva, a density feltétel következik-e (úgy hogy a valószínűségek klasszikus feltételes valószínűségek). Mindegyik konkrét esetben az állapot operátor egyértelműen kiadódik a többi választásból. Az első két esetben van olyan választás, ahol ez a kiadódó állapot nem density operátor, míg a harmadik legkomplexebb esetben mindig density operátor jön ki. Mindezekhez elég komoly matematikai tételeket is kellett használni illetve bizonyítani.

A 4-6 fejezet mindegyike Bell lokális kauzalitás fogalmát hasonlítja/kapcsolja absztraktabb valószínűségelméleti fogalmakhoz. Ezek a fejezetek nagyon hasonlóak egymáshoz, de mindegyik egy-egy világosan kifejtett gondolat köré épül. Megjegyzem, hogy jobb lett volna az 5-ös fejezetet venni előre, mert az 5-ös fejezetben vannak olyan fogalmak pontosan definiálva, amikre már a 4-es fejezetben is szükség van.

A 4-es fejezetben azt fejti ki a szerző, hogy Bell lokális kauzalitás fogalma és a kauzalitási Markov feltétel lényegében ugyanazt mondja, ezt az állítást precízzé teszi majd érvekkel támasztja alá. Mindezt illumináló és

lényegremutató példákkal és rajzokkal illusztrálja. A fejezetet egy matematikai pontossággal kimondott nyitott probléma zárja. E problémabeli állítás bizonyítása precízen is bizonyítaná a két fogalom egyfajta egybeesését.

Az 5-ös fejezetben a Bell-féle lokális kauzalitás fogalmát a Bayes-féle hálózatok d-szeparáló halmazával hozza kapcsolatba hasonló módon, újdonság az irodalomban e két fogalom kapcsolatának vizsgálata. Itt, a 109 oldalon található 4-es definíció szép példája a fogalomalkotás fontosságának és nem-triviális voltának. A 6-os fejezetben Seevinck és Uffink egy 2011-es cikkében kifejtett állítását cáfolja.

A 7-es és 8-as fejezet használja az algebrai kvantumtér elméletet (AQFT). A 7-es fejezetben a szerző az ebben a formalizmusban használt nem-kommutatív közös okok két előnyére mutat rá, a fejezetet érdekes kérdéssel zárja. A 8-as fejezetben igencsak megvilágítóak a példák (és nemcsak azért mert világító-tornyokról szólnak). A 9-es és 10-es fejezetben az EPR kísérletről van szó. A 9-es fejezetben azt bizonyítja a szerző, hogy ha nem teljesül a Bell egyenlőtlenség, akkor egy determinisztikus modellben nem is lehet no-conspiracy elvet teljesítő nem-feltétlenül-közös (separate) magyarázatot találni a korrelációkra. A 10-es fejezet az EPR kísérlet, Bell egyenlőtlenség és közös okok kapcsolatának szép és érdekes logikai analízisét nyújtja.

Két kérdésem van a szerző felé:

1. A hármas fejezetbeli példa-modellben egy dobozból kockát húzunk ki, méréseket végzünk rajta, és ezt az eljárást sokszor ismételjük. (52. old) A kísérletnél nem kell-e specifikálni, hogy visszadobjuk-e a kockákat kihúzás és kísérletezés után, illetve hogy a következő húzás előtt összerázzuk a dobozt? Lehet-e hogy az eredmény más ha nem dobjuk vissza a kockákat (de végtelen dobozra gondolunk)?

2. A második fejezetben, a 39-ik oldalon az áll, hogy a “without in any way disturbing a system” és “the predicting event is also causally irrelevant for the predicted event” ugyanazt fejezi ki. Ezt nem értem, itt nem esett le nekem a tantusz, hogy mi köze a két állításnak egymáshoz. Lehetne-e többet mondani arról, hogy miért ugyanazt fejezi ki ez a két állítás?

A fentiek a dolgozat tartalmáról szólnak. A stílusról, formáról: A dolgozat stílusa igényes. A bevezető világos, informatív, lényegretörő. Matematikailag is elegáns, tiszta, szép, vonzó és igényes a stílus. Például, a kvantorok mindig ki vannak írva és a helyes sorrendben. Az angol nyelv választékos, szép, csak minimális számú nyelvtani hibával (főleg egyes-szám

többszám nem egyeztetése, pl. a 3, 32, 57, 103, 119, 138, 144, 148, 149, 151, 159, 163, 181, 193 oldalakon). Elírást gyakorlatilag nem találtam, ami szép teljesítmény egy 200 oldalas mű esetén. Viszont a tipográfia, a tex-beli gépelési megoldások igen rosszak. Végig, képletek és rajzok sorszámai össze vannak keverve más fejezetbeli sorszámmal. Általában ki lehet találni a helyes sorszámmat, de néha elég sok munkával. Főleg a dolgozat végefelé, a képletek egyre inkább kilógnak a keretből, a 131-132, 171 oldalon például már nem is lehet kitalálni, hogy mi van a sor végén. Egy ilyen igényes dolgozatnál érdemes lett volna ezekre a tipográfiai megoldásokra is odafigyelni.

Összefoglalva: Az értekezés sok érdekes, jelentős új tézist tartalmaz egy aktuális, sokak által vizsgált témában. Ezek alátámasztása igényes érvekkel, precíz fogalmak használatával és korrekt matematikai, fizikai és tudományfilozófiai módszerekkel történik. Az eredmények jól illeszkednek mások munkájához, előreviszik a tudományt. A doktori értekezésben felsorolt tudományos eredményeket alkalmasnak tartom az MTA doktori cím odaítéléséhez. A nyilvános védés kitűzését és a jelöltnek a tudományok doktora cím odaítélését javaslom.

Budapest, 2019. szeptember 30.

Németi István
a matematikai tudományok doktora
Rényi Alfréd Matematikai Intézet